

Соснина Е. Н., канд. техн. наук, доц.,
Чивенков А. И., канд. техн. наук, доц.

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

ВОПРОСЫ СОПРЯЖЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

sosnina@nntu.nnov.ru

Рассмотрены вопросы повышения эффективности использования разнородных источников малой распределенной энергетики (МРЭ) посредством создания Устройства Сопряжения. Приведены варианты структурных схем системы электропитания с источниками МРЭ. Показаны возможные режимы работы системы электропитания при параллельном соединении инвертора напряжения и объединенной энергосистемы. Рассмотрены теоретические основы регулирования активной и реактивной мощности, компенсации мощности искажения.

Ключевые слова: малая распределенная энергетика, возобновляемые источники энергии, устройство сопряжения, инвертор напряжения, управление энергией.

Сегодня будущее энергетической отрасли России все чаще связывают с малой распределенной энергетикой (МРЭ), развитие которой позволит создать дополнительную мощность на случай пиковых нагрузок, предусмотреть резервные источники энергии для социально значимых и стратегически важных объектов и минимизировать риски при авариях в сетях электро- и теплоснабжения. Совершенствование научно-технической базы МРЭ способствует решению проблем дефицита мощности, потерь электроэнергии (ЭЭ) в сетях, роста цен на топливо. В целях поддержки МРЭ в России создана технологическая платформа «Малая распределенная энергетика» [1].

Технологическая платформа поддерживает несколько направлений развития МРЭ, одним из которых является повышение эффективности использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в комплексных локальных энергетических системах. Широкое практическое применение ВИЭ ограничивается двумя серьезными недостатками - невысокой плотностью энергетических потоков и их непостоянством во времени. Как следствие – зависимость производства ЭЭ от погодных условий, возможные колебания выходной мощности, неравномерность выработки ЭЭ. Поэтому для круглогодичного обеспечения потребителей электроэнергией соответствующего количества и качества необходима параллельная работа нескольких разнотипных ВИЭ с другими гарантированными ис-

точниками энергии. При этом возникает проблема согласования выходных параметров ВИЭ с параметрами единой энергосистемы (ЕЭС).

Для решения поставленной задачи необходимо унифицированное устройство, позволяющее сопрягать параметры выходного напряжения ВИЭ и промышленной сети. Такой подход формирует основную концепцию создания Устройства Сопряжения (УС) как устройства бесперебойного питания с широкими возможностями подключения ВИЭ.

Основное функциональное назначение УС состоит в преобразовании параметров ЭЭ:

- переменного тока одного уровня напряжения в переменный ток другого уровня напряжения (трансформаторы) и (или) частоты;
- переменного тока в постоянный (выпрямители);
- постоянного тока в постоянный другого уровня напряжения (конверторы);
- постоянного тока в переменный (инверторы напряжения).

В общем случае ВИЭ разделяются на источники ЭЭ переменного и постоянного тока.

Деление является условным, поскольку в ряде случаев (например, ветрогенераторы) преобразование ВИЭ в ЭЭ может осуществляться как в энергию постоянного, так и переменного тока (табл. 1). Но солнечные батареи преобразуют энергию светового потока только в ЭЭ постоянного тока.

Таблица 1

Возобновляемые источники электроэнергии

Наименование ВИЭ	Вид и параметры генерируемого напряжения	Вид преобразуемой энергии
Ветроэлектрогенератор	Любой, например, трехфазный переменный ток с напряжением 220В/380 В или постоянный ток с напряжением 24В, 48... В	Воздушный поток
Солнечная батарея (СБ)	Постоянный ток с напряжением кратным (10□17) В	Световой поток
Топливные элементы (ТЭ)	Постоянный ток с напряжением кратным (22□50) В	Энергия водорода

Структуру цепей УС определяют количество и виды источников МРЭ.

Источники МРЭ переменного тока, выходное напряжение которых может быть синхронизировано с напряжением промышленной сети (дизель-генераторы), могут работать параллельно с сетью или применяться в качестве источников резервного питания.

При использовании источников МРЭ постоянного тока (СБ, ТЭ) система электропитания оснащается преобразователем постоянного напряжения в постоянное (конвертором). В этом

случае конвертор устанавливается между накопителем ЭЭ и источником МРЭ, и служит для согласования напряжений между ними (рис. 1).

При использовании нескольких источников МРЭ постоянного тока система электропитания оснащается несколькими конверторами. В этом случае каждый конвертор устанавливается между аккумуляторной батареей и источником МРЭ, и служит для согласования напряжений между ними (рис. 2).

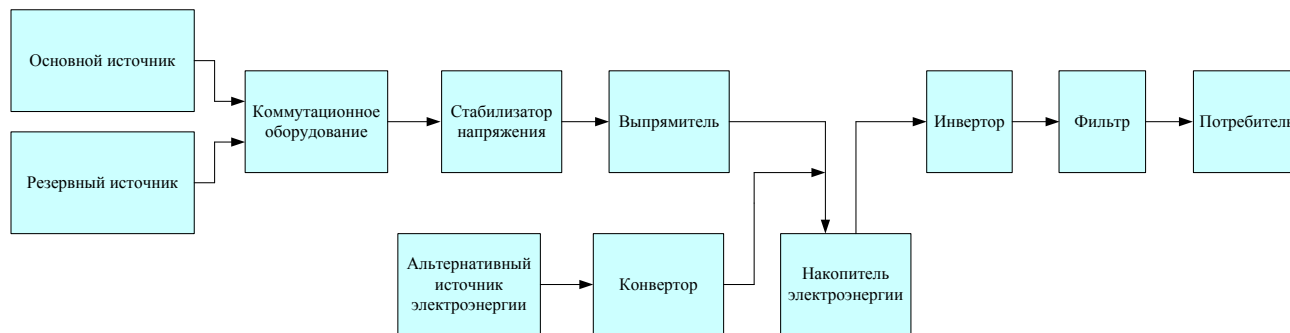


Рис. 1. Структурная схема системы электропитания с одним источником МРЭ



Рис. 2. Структурная схема системы электропитания с несколькими источниками МРЭ

Схема подключения в унифицированном УС источников переменного напряжения, синхронная параллельная работа которых с сетью невозможна, аналогична структурной схеме, по-

казанной на рис. 2, но вместо конвертора возможно использование активного выпрямителя (рис. 3).

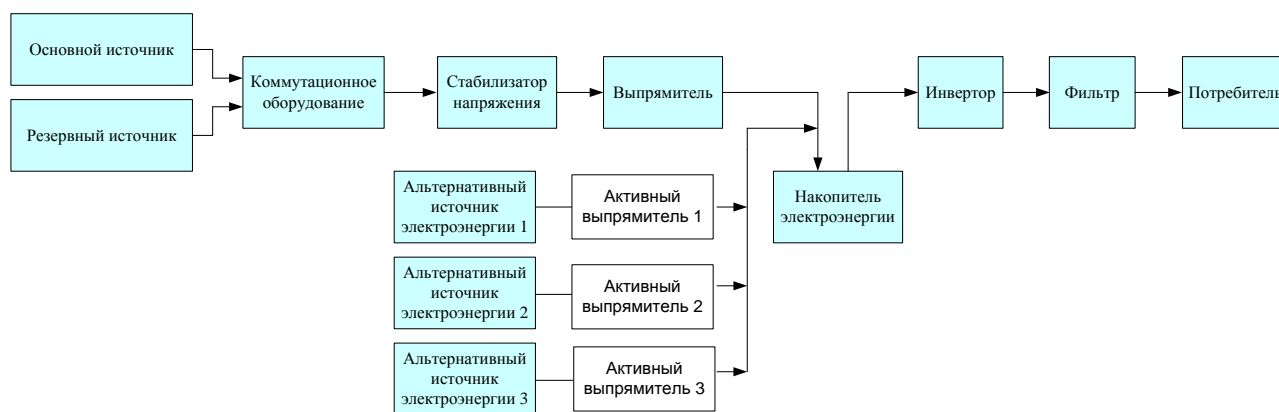


Рис. 3. Структурная схема системы электропитания с несколькими источниками МРЭ переменного тока

Представленные структурные схемы не охватывают всего многообразия построения систем электропитания с источниками МРЭ. Однако, и приведенные схемы наглядно показывают, что почти все системы электропитания, объединяющие несколько источников МРЭ для

обеспечения бесперебойной работы потребителей обязательно содержат УС, основой которых являются инверторы напряжения (ИН).

Особый интерес представляет система электропитания при параллельном соединении ИН и ЕЭС (рис. 4).

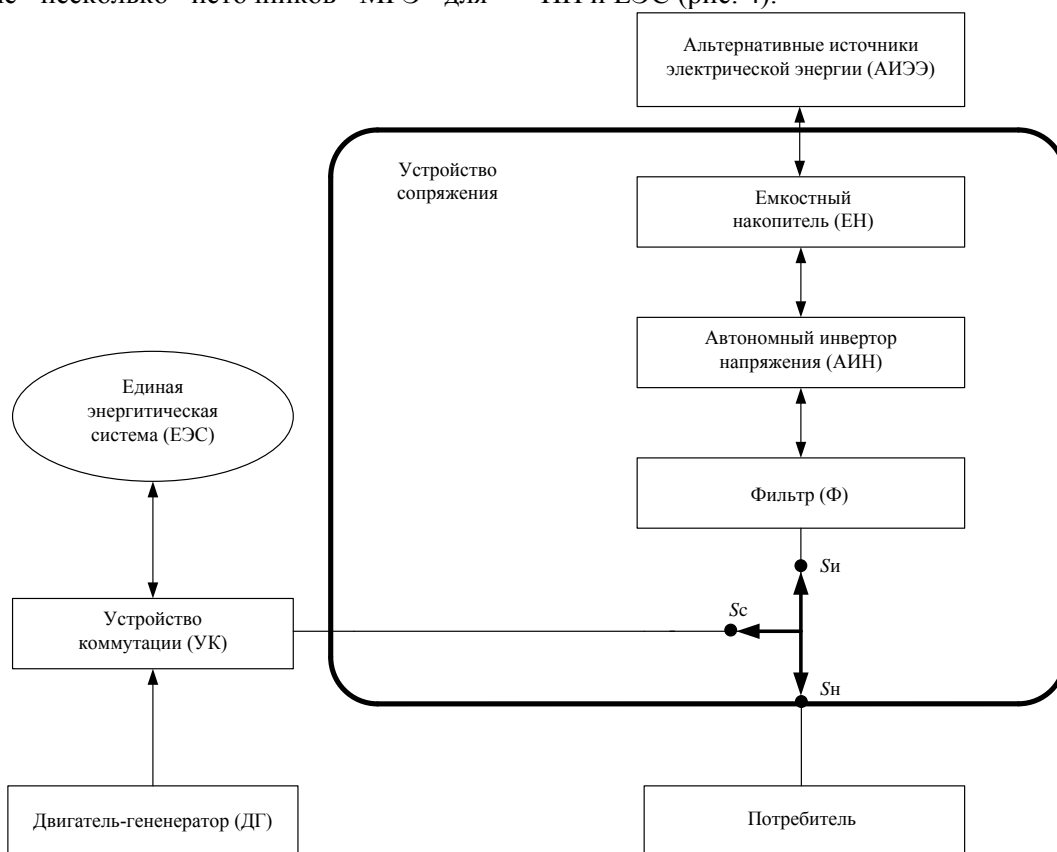


Рис. 4. Структурная схема системы электропитания при параллельном соединении ИН и ЕЭС

Такое включение может обеспечить регулирование потоков ЭЭ (активной и реактивной) от источников МРЭ и ЕЭС. В табл. 2 приведены возможные режимы работы системы электропитания при параллельном соединении ИН и ЕЭС.

С точки зрения выявления законов управления энергией наибольший интерес для исследований представляют режимы 4 и 6, обеспечивающие совместную работу двух энергосистем на одну нагрузку и возможность компенсации реактивной мощности, потребляемой из ЕЭС, за счет энергии источников МРЭ.

Таким образом, можно принять два направления исследований схмотехнических решений и законов управления:

- входные цепи заряда накопителей ЭЭ;
- сопряжение цепей постоянного и переменного тока.

Схмотехнические решения обозначенных направлений могут быть реализованы как на основе управляемых вентилях на частоте напряжения питающей сети, так и использованием современной базы силовых транзисторов на повышенной частоте.

Базовыми положениями при исследовании законов управления являются теоретические основы регулирования активной и реактивной мощности, компенсации мощности искажения.

Активная мощность P определяется как среднее значение мгновенной мощности $p(t)$ за период T :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt \quad (1)$$

где $u(t)$, $i(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока, протекающие в цепи.

Рассмотрим идеализированную однофазную систему питания, в которой к синусоидальному источнику ЭДС подключена активно-индуктивная нагрузка (рис. 5).

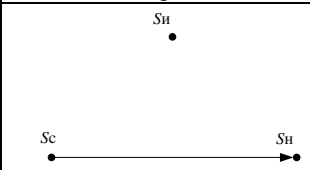
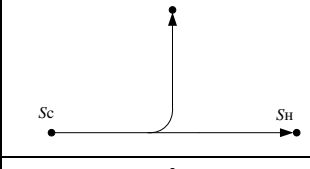
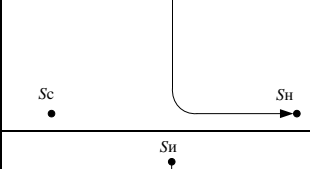
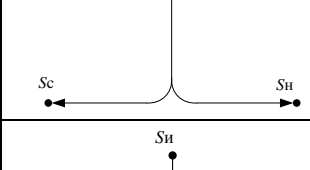
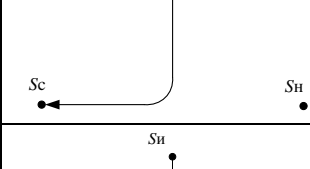
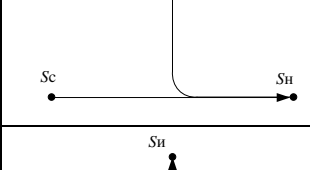
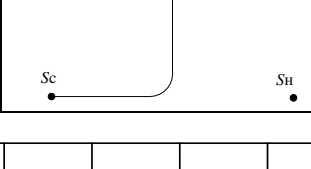
$$u = U \sqrt{2} \sin \omega t; \quad (2)$$

$$i = I \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi); \quad (3)$$

где U, I – действующие значения напряжения и тока, протекающие в цепи; φ – фазовый угол сдвига между напряжением и током.

Таблица 2

Режимы работы системы электропитания при параллельном соединении ИН и ЕЭС

Номер режима	Направления движения энергии	Возможные состояния электрических энергосистем		Примечание
		Источники МРЭ	ЕЭС	
1		Неготовность системы или ее отсутствие	Излишек энергии	$S_c > S_n$
2		Дефицит энергии	Излишек энергии	$S_c > S_n + S_n$
3		Излишек энергии	Дефицит энергии (вплоть до ее полного отсутствия)	$S_n > S_n$
4		Излишек энергии	Дефицит энергии	$S_n > S_n$
5		Излишек энергии	Дефицит энергии	Отсутствует нагрузка $S_c > S_n$
6		Излишек энергии	Дефицит энергии	$S_n < S_c + S_n$
		Дефицит энергии	Излишек энергии	
7		Дефицит энергии	Излишек энергии	Отсутствует нагрузка $S_c > S_n$

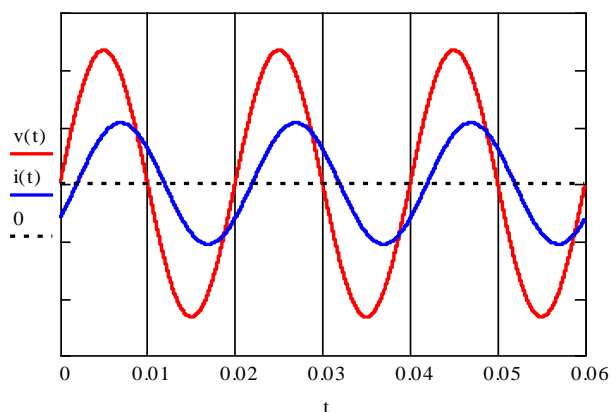


Рис. 5. Осциллограмма напряжения и тока для активно-индуктивной нагрузки

Передаваемая мгновенная мощность равна:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t); \tag{4}$$

$$p(t) = 2U \cdot I \sin(\omega t) \sin(\omega t - \varphi) \tag{5}$$

$$p(t) = U \cdot I \cos(\varphi) - U \cdot I \cos(2\omega t - \varphi) \tag{6}$$

$$p(t) = U \cdot I \cos(\varphi)[1 - \cos(2\omega t)] - U \cdot I \sin(\varphi)\sin(2\omega t) \tag{7}$$

Из выражения (7) видно, что передаваемая мгновенная мощность состоит из двух составляющих. Первая составляющая $p(t) = U \cdot I \cos(\varphi)[1 - \cos(2\omega t)]$ - имеет постоянную компоненту - $U \cdot I \cos(\varphi)$ называемую активной мощностью, и переменную компоненту $-U \cdot I \cos(\varphi)\cos(2\omega t)$, пульсирующую с двойной частотой и никогда не принимающей отрицательного значения, следовательно, имеющей единственное направление потока мощности от источника к приёмнику.

Во второй составляющей $U \cdot I \sin(\varphi)\sin(2\omega t)$ - амплитуда сигнала равна $U \cdot I \sin(\varphi)$ - определяемая как реактивная мощность,

переменная компонента $\sin(2\omega t)$ так же пульсирует с двойной частотой, но может принимать, как положительное, так и отрицательное значение, поэтому направление

потока мощности непрерывно изменяется (от источника к приёмнику и от приёмника к источнику), при этом среднее значение второй компоненты равно нулю.

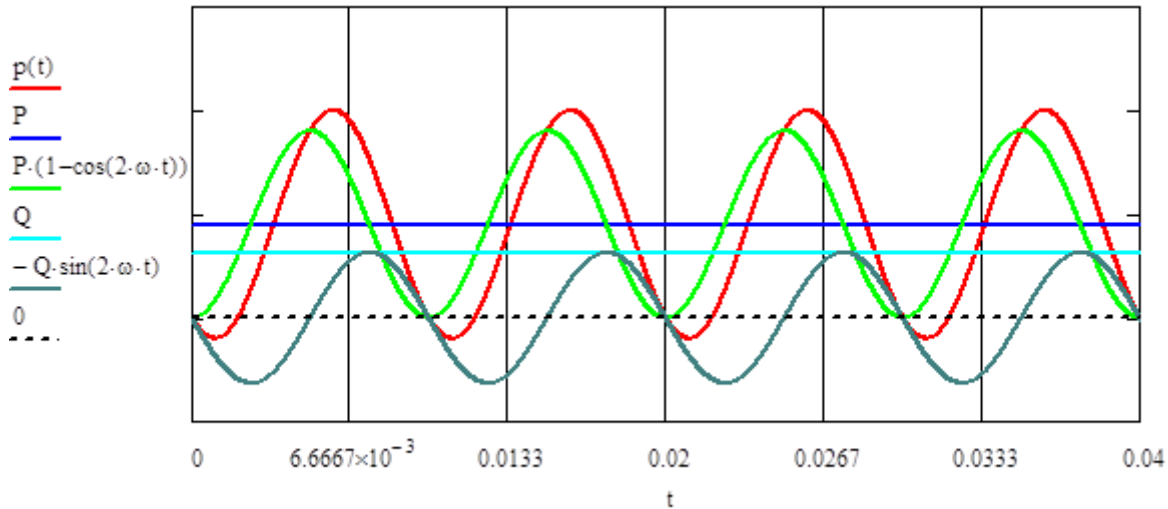


Рис. 6. График разложения мгновенной мощности на составляющие

Активная мощность физически представляет собой энергию, которая выделяется в единицу времени в виде теплоты на участке цепи в сопротивлении R. Действительно произведение $U \cos(\phi) = IR$. Следовательно,

$$P = UI \cos(\phi) = I^2 R \quad (8)$$

Реактивная мощность представляет собой энергию, которой обменивается источник и реактивная составляющая нагрузки

$$Q = UI \sin(\phi) \quad (9)$$

Полная мощность или кажущаяся определяется следующим соотношением:

$$S = U \cdot I \quad (10)$$

Полная мощность для синусоидального напряжения и тока определяется:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (11)$$

Используя разложения в ряд Фурье, для кривой, симметричной относительно начала координат, запишем функции напряжения и тока для несинусоидального периодического сигнала

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (12)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (13)$$

Действующие значения напряжения и тока вычисляются по выражениям:

$$U = \sqrt{\frac{T}{T_0} \int_0^{T_0} u^2 dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{2}} \quad (14)$$

$$I = \sqrt{\frac{T}{T_0} \int_0^{T_0} i^2 dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}} \quad (15)$$

где U_n, I_n - действующее значение напряжения и тока для n -ой гармоники, при разложении несинусоидального сигнала в ряд Фурье.

Соответственно активная и реактивная мощность определяется, как сумма активных и реактивных мощностей отдельных гармоник.

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n I_n}{2} \cos(\alpha_n - \beta_n) \quad (16)$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n I_n}{2} \sin(\alpha_n - \beta_n) \quad (17)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (18)$$

С учётом вышесказанного полная мощность, формируемая несинусоидальным периодическим сигналом напряжения и тока, вычисляется:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (19)$$

Графически зависимость этих мощностей можно показать на векторной диаграмме в виде четырёхугольника (рисунок 7)

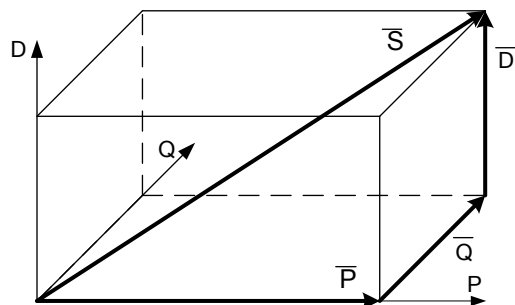


Рис. 7. Четырёхугольник мощностей

Для электроприёмников переменного тока вводится понятие коэффициента мощности K_m , определяемое как отношение потребляемой активной мощности к полной:

$$K_m = \frac{P}{S} \quad (20)$$

Использование нелинейной нагрузки вызывает передачу неактивной мощности (реактивной мощности и мощности искажения) в питающей сети, как от источника к приёмнику, так и от приёмника к источнику. К нагрузкам 0,4 кВ, имеющим повышенное потребление реактивной мощности и мощности искажения, относят полупроводниковые преобразователи для электроприводов; электросварочные установки (ЭСУ); осветительные установки; коммунально-бытовую нагрузку.

Передача неактивной мощности во многих случаях экономически нецелесообразна по следующим причинам:

- при передаче значительной неактивной мощности возникают дополнительные потери активной мощности и ЭЭ в целом во всех элементах системы электроснабжения;
- загрузка неактивной мощностью систем электроснабжения и трансформаторов уменьшает их пропускную способность и требует увеличения сечений проводов воздушных и кабельных линий, увеличения номинальной мощности или числа трансформаторов подстанций;
- следствием характера тока, потребляемого импульсной нагрузкой (ЭСУ), является деформация синусоиды напряжения, действующей на зажимах нагрузки. В

реальности сеть для любого электропотребителя представляет собой некое сопротивление. Несинусоидальные токи, протекая по этому сопротивлению, вызывают падение напряжения на нем. В результате, на зажимах нелинейного электроприемника, а также на зажимах всех остальных электроприемников, включенных параллельно ему, появляется несинусоидальное напряжение.

- протекание по проводам несинусоидальных токов, вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, приводит к увеличению активного сопротивления обмоток трансформатора и, как следствие, к их дополнительному нагреву.

- вследствие протекания в силовых кабелях высокочастотных гармоник тока, в прилежащих кабелях телекоммуникаций могут наводиться помехи.

Поэтому при разработке УС систем питания от источников МРЭ следует предусматривать нелинейный характер нагрузки и повышенное потребление реактивной мощности.

Представление полной мощности в виде геометрической суммы активной, реактивной и мощности искажения (рис. 7) и с учётом выражений (16) - (18) предполагает три основных направления снижения неактивной мощности:

1. уменьшение угла сдвига между напряжением и током потребляемой нагрузкой, то есть снижение или компенсация реактивной мощности.

2. улучшение гармонического состава (фильтрация высших гармоник) сетевого напряжения и тока, потребляемой нелинейной нагрузкой, тем самым уменьшение мощности искажения.

3. регулирование величины активной мощности за счет амплитуды выходного напряжения регулирующего устройства по отношению к сети.

Теоретические основы регулирования активной и реактивной мощности, компенсации мощности искажения позволяют разработать алгоритмы управления ЭЭ, которые лягут в основу автоматизированной системы управления энергией при создании Устройства сопряжения параметров разнородных источников МРЭ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меморандум о создании и деятельности технологической платформы «Малая распределенная энергетика», утвержден на совещании организаций-участников технологической платформы 3 февраля 2011 год.